

Avaliação da qualidade da água utilizando a teoria fuzzy

Evaluation of water quality using the fuzzy theory

H. L. Garcia¹; V. L. Silva¹; L. P. Marques¹; C. A. B. Garcia²; F. O. Carvalho³

¹*Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Química, Laboratório de Engenharia Ambiental e Qualidade (LEAQ), Universidade Federal de Pernambuco, 50670-901, Recife-Pe, Brasil*

²*Laboratório de Química Analítica Ambiental, Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-Se, Brasil*

³*Laboratório de Sistemas Inteligentes Aplicados, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, 57.072-970, Maceió-Al, Brasil*

helenicelgarcia@gmail.com

(Recebido em 27 de junho de 2012; aceito em 11 de julho de 2012)

A qualidade da água, atualmente, é tratada em todos os âmbitos da engenharia, com vista a um desenvolvimento sustentável do meio ambiente. Neste cenário, a avaliação da qualidade da água é essencial e, neste trabalho, esta foi realizada através do monitoramento dos parâmetros indicadores do nível trófico do reservatório de água Jacarecica I no Estado de Sergipe. Neste, foram realizadas análises físico-químicas e constituída uma linguagem *fuzzy* para classificação dos dados ambientais. A lógica *fuzzy* é uma técnica de inteligência artificial que se baseia no conhecimento especialista do fenômeno a ser tratado, para se ter uma linguagem heurística traduzida numericamente. Para utilização dessa teoria nebulosa, foi calculado o índice trófico do reservatório através da correlação de Carlson modificada e estabelecidos os limites para as variáveis *fuzzy*. As variáveis químicas utilizadas foram a clorofila-a, fosforo e nitrogênio total e foram traduzidas em quatro níveis de eutrofização do corpo hídrico (Oligotrófico, Mesotrófico, Eutrófico e Hipereutrófico). Dessa forma, os resultados mostraram que o nível de qualidade da água do reservatório está entre oligotrófico e eutrófico e a utilização da lógica fuzzy foi aplicada de forma satisfatória para mostrar esses níveis de eutrofização.

Palavras-chave: qualidade da água; lógica fuzzy; eutrofização

Water quality is currently treated in all fields of engineering, with a view to developing a sustainable environment. In this scenario, the assessment of water quality is essential and in this work, which was evaluated by monitoring of indicators of the trophic level of water reservoirs Jacarecica I in the state of Sergipe. In this, we carried out physicochemical analyzes and constituted a fuzzy language for classification of environmental data. Fuzzy logic is an artificial intelligence technique that is based on expert knowledge of the phenomenon to be treated, to have a heuristic language translated numerically. For use of fuzzy theory, we calculated the trophic index of the reservoir through the correlation of modified Carlson and established the boundaries for the fuzzy variables. The chemical variables were used to chlorophyll-a, total nitrogen and phosphorus and have been translated into four levels of eutrophication of water body (oligotrophic, mesotrophic, eutrophic and hypereutrophic). Thus, the results showed that the level of water quality in reservoir Jacarecica I are between oligotrophic and eutrophic and the use of fuzzy logic was applied satisfactorily to show these levels of eutrophication.

Keywords: water quality; fuzzy logic; eutrophication

1. INTRODUÇÃO

A lógica fuzzy pode ser compreendida como sendo a ampliação da lógica tradicional com a introdução de conceitos de parcialidade de uma variável para representar o sistema. Ou seja, neste tipo de análise existe um grau de incerteza que faz menção a um determinado elemento que pertença parcialmente e não pertença parcialmente a determinado conjunto de informações representativas de um processo.

A lógica fuzzy é uma técnica de inteligência artificial baseada no conhecimento heurístico, geralmente representado por um conjunto de expressões condicionantes para representar os fenômenos, os processos, com base no conhecimento de especialista dos mesmos [1].

Os sistemas difusos (lógica fuzzy) foram responsáveis, nas últimas três décadas, por mudanças significativas nas aplicações industriais da Inteligência Artificial, especialmente em sistemas de controle, tendo sua aplicação na avaliação de riscos e impactos econômicos e ambientais, automação e controle de processos, e a sistemas de apoio de decisão, etc [2].

No que concerne à avaliação e monitoramento de sistemas hídricos, vários autores utilizaram a lógica fuzzy para classificar ou avaliar os sistemas quanto a sua qualidade para determinado uso do recurso hídrico[3-8]. Dentre estes, merece destaque a aplicação de técnicas matemáticas avançadas para auxiliar no gerenciamento e monitoramento da qualidade da água com o objetivo de detectar episódios (fenômenos) de qualidade a partir do comportamento das variáveis ambientalmente representativas desses fenômenos [8].

Neste contexto, a lógica fuzzy possibilita classificar em números reais uma determinada realidade ou situação que está atrelada a variáveis linguísticas, incerta ou vagas (parcialidade das variáveis). Sendo assim, é possível a modelagem realista de sistemas tendo como objetos de análise conceitos paradoxais, variáveis qualitativas, quantidades imprecisas, conceitos vagos ou mal definidos.[9][10]

De forma mais objetiva e preliminar, define-se ainda lógica fuzzy como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores de hoje em dia.[11]

A lógica fuzzy pode ser utilizada nos mais variados tipos de processos [12]. A utilização de regras nebulosas e variáveis linguísticas conferem ao sistema, por exemplo, ao sistema de monitoramento hídrico, diversas vantagens. Entre estas vantagens, destacam-se a simplificação do modelo do processo; a facilidade na especificação das regras de controle, em linguagem próxima à natural; a satisfação de múltiplos objetivos de controle; e facilidade de incorporação do conhecimento de especialistas humanos.

Com certo grau de incerteza, a maioria dos dados ambientais é utilizada para classificar os sistemas hídricos em próprio ou impróprio para determinado uso. Inserido neste contexto, o fenômeno de eutrofização revela as características de um reservatório classificando em quatro níveis [13].

A eutrofização é considerada como o aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio nos ecossistemas aquáticos, que têm como consequência o aumento de suas produtividades [14]. Alguns problemas decorrentes deste processo são estímulo ao crescimento excessivo de algas, acarretando a redução do oxigênio dissolvido, aumento da taxa de decomposição da matéria orgânica e deterioração da qualidade da água.

Assim, determinar o estado trófico é uma ação fundamental para obtenção de informações sobre um reservatório, pois o seu conhecimento permite descrever as relações abióticas e bióticas deste ecossistema. Para tal, definiu-se o Índice de Estado Trófico (IET) com base na biomassa fitoplanctônica presente em determinado corpo d'água, em local e tempo específicos [13]. Neste índice estão inseridas as variáveis clorofila a, fósforo total e nitrogênio total para estimar a concentração de biomassa de algas. Como resultado, as equações apresentadas na Tabela 1 são utilizadas para determinar o IET.

Tabela 1: Equações para o IET

Equação	Variável
$IET (Chl) = 9,81 \ln(Chl) + 30,6$	Clorofila (Chl), medida em $\mu g.L^{-1}$
$IET (P_T) = 14,42 \ln(P_T) + 4,15$	Fósforo total (P_T), medido em $\mu g.L^{-1}$
$IET (N_T) = 54,45 + 14,43 \ln(N_T)$	Nitrogênio total (N_T), medido em $mg.L^{-1}$

Com base no cálculo do IET, o Quadro 1 mostra também uma classificação amplamente utilizada pela CETESB em relação somente das medidas desse índice.

Quadro 1: Classificação do estado trófico e suas características principais

Valor do IET	Classificação de Estado Trófico do Corpo Hídrico	Características
47 < IET = 52	Oligotrófico	Sem ocorrência de interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes.
52 < IET = 59	Mesotrófico	Níveis aceitáveis de comprometimento para usos diversos, na maioria dos casos.
59 < IET = 63	Eutrófico	Redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas
> 63	Hipereutrófico	Elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos

Fontes: Adaptada de CETESB (2007); Lamparelli (2004)

2. LÓGICA FUZZY

Em 1960, Zadeh publicou *Fuzzy Sets, Information and Control*, que mostrava que os recursos tecnológicos eram incapazes automatizar processos complexos utilizando a bivalência booleana. Isto provocou o surgimento da lógica fuzzy ou lógica difusa [15].

A lógica fuzzy, então, introduziu os conceitos de parcialmente falsos ou parcialmente verdadeiros, considerando um grau de incerteza que varia entre 1 (verdadeiro) e 0 (falso) para definir um conjunto fuzzy.

Dessa forma, a aplicação de um modelo fuzzy consiste no desenvolvimento das seguintes etapas: definir a função de pertinência, as regras de inferência e processo de defuzzificação.

2.1 Função de pertinência

Os conjuntos fuzzy são definidos em sua forma através de sua função de pertinência que mostra a intensidade com que o objeto pertence ao conjunto fuzzy. Existem várias formas de representar uma função fuzzy de pertinência, sendo que, as mais usuais são a triangular, gaussiana, trapezoidal, sigmóide bipolar, S e quadrática, sendo todas definidas no intervalo de pertinência de 0 a 1 [16].

A função triangular é caracterizada por uma terna (a, b, c) sendo que a e c determinam o intervalo para o qual a função assume valores diferentes de zero, e b representa o ponto no qual a função de pertinência é máxima. Ou seja, os números fuzzy começam a subir a partir de zero $x = a$; atingem um máximo de 1 em $x = b$; e retornam a zero em $x = c$. A função $\mu(x)$ de um número fuzzy triangular é representada nas Equações 1 e 2.

$$\text{trimf}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x - a)/(b - a), & a < x \leq b \\ (c - x)/(c - b), & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Ou } \text{trimf}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x - a}{b - a}, \frac{c - x}{c - b}\right), 0\right) \quad (2)$$

2.2 Regras de inferência fuzzy

Define-se inferência como a passagem, através de regras válidas, do antecedente (SE) ao consequente (ENTÃO) de um objeto de estudo em um universo de análise. Na lógica fuzzy, essa passagem é realizada mediante a interação, determinada pelas regras de inferência, entre as variáveis linguísticas de entrada (SE), gerando um conjunto de dados de saída (ENTÃO). Essas regras são aplicadas aos conjuntos fuzzy através das variáveis linguísticas e são construídas mediante a operação entre os conjuntos [16].

No procedimento de inferência é analisado o grau de pertinência associado aquele mesmo valor numérico no universo de discurso relacionando-os a uma base de regras conforme a condicional se – então. O tipo de inferência ocorre:

If(Se) < antecedente > then(Então) < conseqüente > Ou SE < situação > ENTÃO < ação >

Na lógica clássica a inferência é dada pela comparação, sendo que somente é permitida uma compatibilidade exata da variável. Entretanto, no raciocínio difuso é possível adotar um valor aproximado dependendo da pertinência ou *fuzzificação* dessa variável ao conjunto *fuzzy*. [17][18]

2.3 Defuzzificação

O processo de *defuzzificação* é utilizado quando a inferência é realizada em um sistema do tipo clássico com o objetivo de obter um valor de saída numérico[19][18]. Em um sistema de inferência fuzzy, como no caso Mamdani, a característica de saída é obtida a partir de valores defuzzificados de produção de conjuntos fuzzy resultantes da agregação de diferentes resultantes de cada regra (fornecidas após a fuzzificação) da base de regras de inferência distribuídas no universo de discurso.

No processo de defuzzificação [20] é necessário identificar o domínio das variáveis de saída e dentre os métodos existentes, os mais utilizados são:

1. Primeiro máximo (SOM): neste, determina-se o valor de saída através do ponto em que o grau de pertinência atinge o primeiro valor máximo;
2. Método de média dos máximos (MOM): determina-se o ponto médio entre os valores que têm o maior grau de pertinência inferido pelas regras;
3. Método do centro de gravidade (COG): neste, fornece-se a abscissa do centro de massa associado ao gráfico da função de pertinência resultante da fase de inferência.

Sendo assim, após a entrada das variáveis numéricas precisas, são ativadas as regras (*fuzzificação*), em seguida o sistema de inferência determina como as regras (determinadas por especialistas) são combinadas. Como resultado do processo, tem-se uma agregação entre as respostas das regras e após a escolha do tipo de resposta em relação a distribuição dos dados agregados (*defuzzificação*) tem-se a resposta do modelo no domínio das variáveis de saída correspondente a um universo amostral. As entradas e saídas do sistema são denominadas respectivamente, *fuzzificação* e *defuzzificação*, e correspondem às etapas principais de modelos de lógica fuzzy [21]. Esses passos estão organizados na Figura 1.

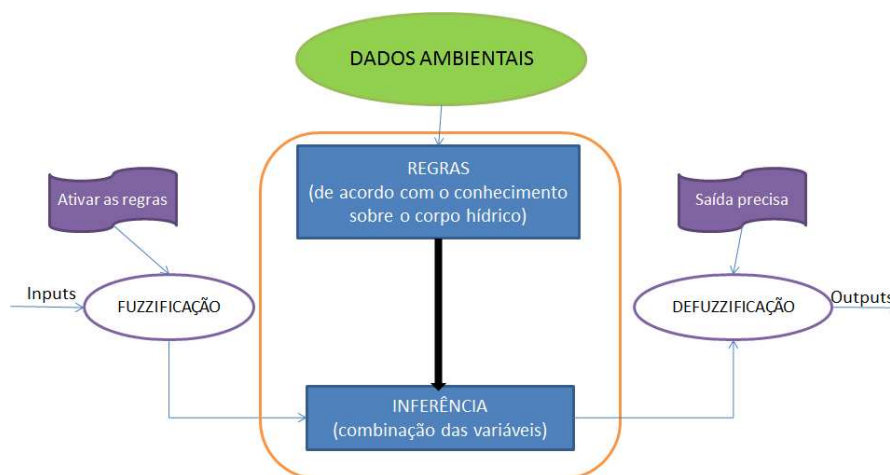


Figura 1: Esquematização do Modelo Fuzzy

Fonte: Adaptada de Malutta (2004)[21]

Neste sentido, em resumo, são estabelecidas as seguintes etapas para metodologia fuzzy:

- a. Etapa de fuzzificação: etapa na qual se modela matematicamente a informação das variáveis de entrada do sistema por meio de conjuntos fuzzy. Nesta etapa, o papel do

especialista ou o conhecimento do sistema é notado, pois para cada variável de entrada termos linguísticos devem ser atribuídos para representa-la e cada termo linguísticos deve ser associado ao conjunto fuzzy através da função de pertinência definida.

b. Etapa do conjunto de regras e inferência: é o cerne do conhecimento, ou seja nesta etapa são inseridas as variáveis e suas classificações linguísticas; nesta, define-se os conectivos lógicos para modelar as regras estabelecidas.

c. Etapa de defuzzificação: nesta etapa é realizada transformação da variável de saída fuzzy em um valor numérico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Procedimentos Metodológicos

A metodologia adotada para caracterização físico-química dos reservatórios foi a análise dos parâmetros de acordo com a Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association [22].

Os critérios de qualidade da água adotados neste trabalho levaram em conta os aspectos físicos, químicos e biológicos [23], conforme apresentado na Tabela 2.

2.2. Amostragens

As coletas foram realizadas diretamente nos frascos removendo-se as tampas dos mesmos, em seguida lavava-os com a mesma água a ser coletada e com uma das mãos mergulhando-os de modo que a boca do mesmo ficasse de 5 da 10 cm abaixo da superfície da água, evitando uma eventual contaminação superficial.

Em seguida, as amostras foram acondicionadas, em frascos de polietileno de um litro e mantidas em caixa de isopor com gelo, para conservação em baixa temperatura e proteção contra a luz até chegarem ao laboratório de Química Analítica Ambiental da Universidade Federal de Sergipe. No momento da coleta, foram determinadas temperatura da água e oxigênio dissolvido.

A Tabela 2 mostra as médias dos dados ambientais utilizadas neste trabalho.

Tabela 2: Dados experimentais sobre o Reservatório Jacarecica I

Indicador Ambiental	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4		Campanha 5	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
pH	7,78	0,05	7,71	0,16	7,92	0,25	7,78	0,12	7,92	0,27
Transparência (m)	0,54	0,11	0,65	0,33	0,73	0,34	0,38	0,11	0,48	0,03
Temperatura (°C)	28,34	2,63	26,92	1,03	26,78	0,62	-	-	28,13	1,35
Cond. elétrica ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)	423	28,19	553,8	86,4	510,2	30,44	310,2	16,51	381,8	4,05
OD ($\text{mg}.\text{L}^{-1}$)	5,13	2,07	4,82	2,48	5,97	1,65	4,11	0,88	4,93	2,06
N-NH_4^+ ($\mu\text{g}.\text{L}^{-1}$)	22,49	16,51	15,24	13,57	9,81	12,28	26,65	8,48	16,09	8,62
NO_2^- ($\mu\text{g}.\text{L}^{-1}$)	6,18	3,48	5,42	4,19	11	17,87	18,97	11,7	11,36	2,24
NO_3^- ($\mu\text{g}.\text{L}^{-1}$)	17,19	17,15	1,96	1,09	96,29	121,5	415,1	478,1	301,3	760,4
N_{Total} ($\text{mg}.\text{L}^{-1}$)	0,02	0,01	0,07	0,05	0,42	0,08	1,22	0,98	0,18	0,11
P_{Total} ($\text{mg}.\text{L}^{-1}$)	-	-	0,02	0,02	0,08	0,05	0,01	0,03	0	0,01
Clorofila ($\mu\text{g}.\text{L}^{-1}$)	2,67	1,22	33,38	22,81	16,3	3,84	0,42	0,08	0,82	0,62

Em função dos resultados obtidos dos parâmetros da água analisados mostrados na Tabela 1 é possível ressaltar que ocorreu uma redução na concentração do oxigênio dissolvido no período chuvoso, e anoxia no hipolímnio, durante o período de estiagem. Sendo assim, o reservatório de Jacarecica I, apresenta características de sistemas oligotróficos a eutróficos, tornando-se mais eutrofizado no final do período de estiagem e início do período chuvoso.

É importante ressaltar também que pela análise dos índices de estado trófico e de seus desvios, o nutriente limitante do reservatório no período de estiagem é o nitrogênio e, durante o período chuvoso, a limitação passa a ser do fósforo. Neste sentido, esses parâmetros não poderiam estar fora de uma análise *fuzzy*.

No que se refere às concentrações de nitrato e nitrito, os valores estão dentro dos limites estabelecidos pela Resolução nº 375/05 do CONAMA para as classes 1 e 2 e a média da concentração de fósforo total para o mês de maio, foi muito acima do limite estabelecido por esta mesma resolução e classes.

Ressalta-se que as concentrações dos nutrientes do sistema aumentaram no período chuvoso, em decorrência de uma maior alimentação de matéria orgânica e de fertilizantes, associado à falta de vegetação ciliar nas margens do reservatório. Estas constatações indicam a necessidade de um planejamento de recuperação ambiental das áreas próximas ao reservatório.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da aplicação da sistemática fuzzy foi desenvolvida utilizando o conjunto de indicadores ambientais (Tabela 2) para definir um indicador de saída (IET). Esses indicadores foram identificados pelos especialistas da área [24] que ressaltaram a importância da clorofila, nitrogênio e fósforo no gerenciamento de fontes de abastecimento de água para consumo humano, incluindo o tratamento de água.

4.1 Aplicação da Lógica Fuzzy

Com base no conhecimento dos sistemas, as funções das variáveis de entrada e variável de saída foram definidas utilizando o *Fuzzy Logical Toolbox* do MATLAB. Nesta etapa, o método de inferência *fuzzy* foi o método de Mamdani e para etapa de defuzzificação foi utilizado o método do centro de gravidade (*Centroid*), conforme se identifica na Figura 2. A função de pertinência trapezoidal foi utilizada para todas as variáveis.

Para implementação da estratégia fuzzy foi considerado que:

- a. As três variáveis de entrada foram definidas a partir dos resultados da aplicação do modelo de redes neurais [25-26] e da avaliação do índice de qualidade da água, como aquelas que mais influenciam na qualidade da água, segundo especialistas: clorofila-a, fósforo e nitrogênio.
- b. A variável de saída foi o índice de qualidade da água, classificando quanto o sistema em quatro níveis tróficos do sistema.
- c. A função de pertinência triangular foi a mesma para cada variável de entrada e para variável de saída.
- d. Foram implementadas 23 regras fuzzy de acordo com o grau de importância ou de pertinência para a resposta do sistema, de acordo com as definições dos especialistas.

A Figura 2 mostra a tela obtida no MATLAB para identificação das variáveis de entrada e da variável de saída.

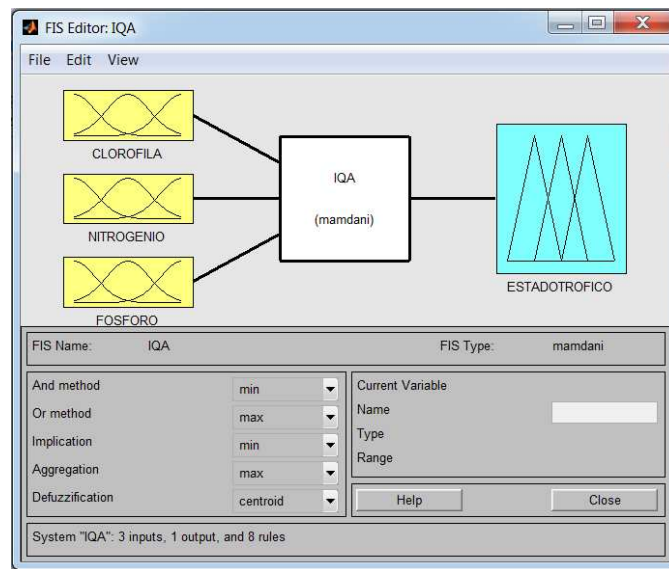


Figura 2: Variáveis de entrada e de saída definidas no sistema fuzzy

As Figuras 3, 4 e 5 mostram as condições fuzzy implementadas para as variáveis de entrada do modelo.

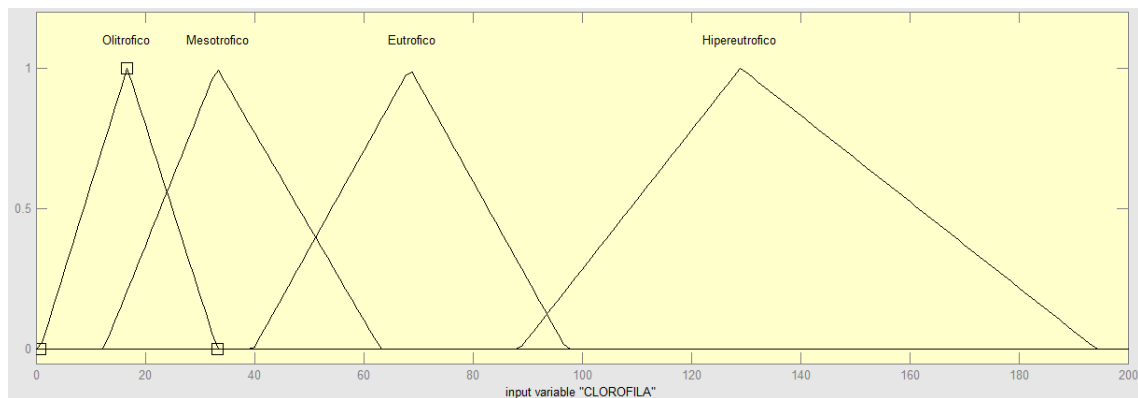


Figura 3: Variável linguística clorofila

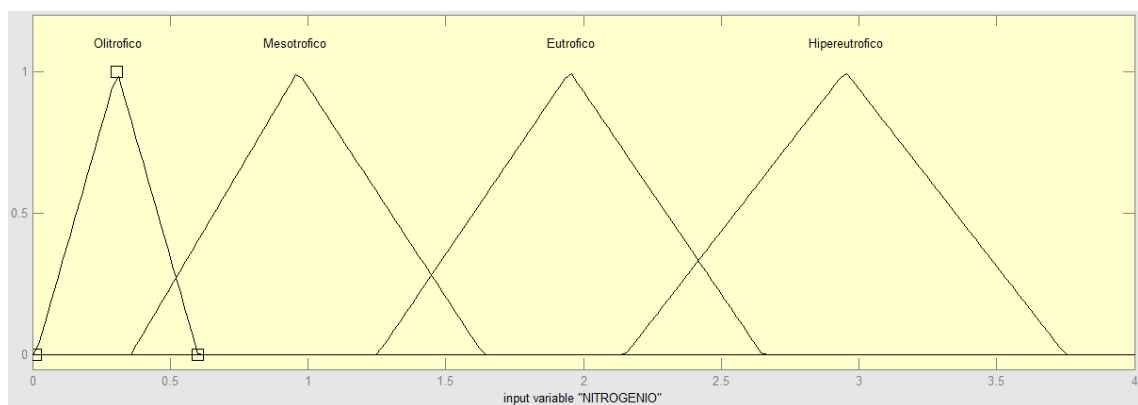


Figura 4: Variável linguística nitrogênio

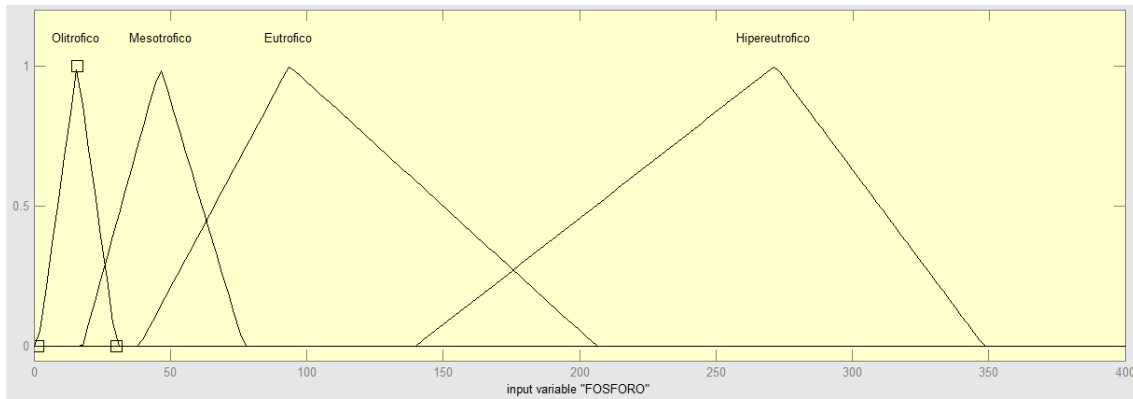


Figura 5: Variável linguística fósforo

A Figura 6 mostra o conjunto de saída para IET. Para os subconjuntos deste índice, tem-se que o subconjunto OLIGOTRÓFICO é representado pela terna (0,00414; 0,1141; 0,234); o subconjunto MESOTRÓFICO é representado pela terna (0,0959; 0,26; 0,4013); o subconjunto EUTRÓFICO é representado pela terna (0,3395; 0,4205; 0,5095); e o subconjunto HIPEREUTRÓFICO é representado pela terna (0,444; 0,626; 0,85). É importante ressaltar, então, que acima de 0,85 o sistema poderia ser classificado como hiperhipereutrófico, podendo ser um novo termo linguístico a ser implementado.

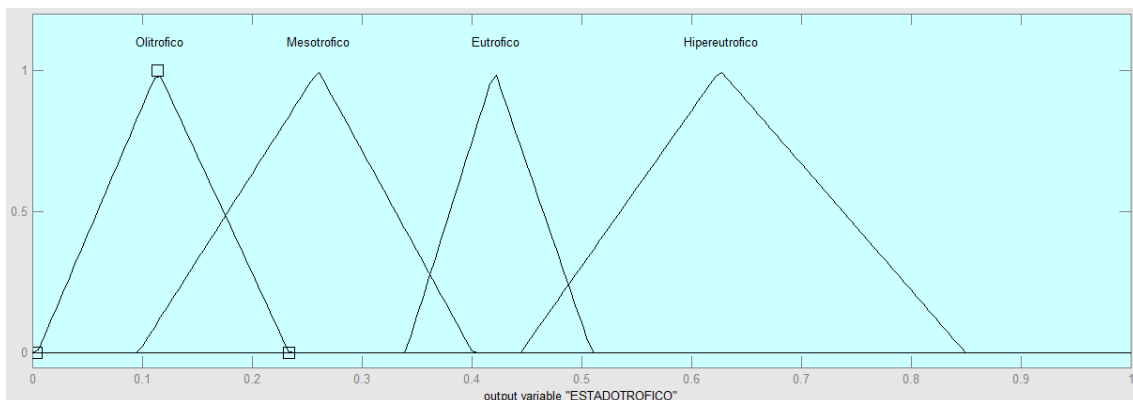


Figura 6: Condições fuzzy – variável de saída IET

A Figura 7 mostra o conjunto de 23 regras *fuzzy* aplicado ao sistema hídrico. Nesta, é possível observar que para cada valor atribuído às variáveis de entrada, por exemplo, clorofila $80,5 \mu\text{g.L}^{-1}$, nitrogênio 2 mg.L^{-1} e fósforo 200 mg.L^{-1} , como resposta o sistema gera IET de 0,747 que representa 74,7 % de segurança na resposta referente às condições do reservatório. Na literatura, uma resposta acima de 70% é bom grau de acerto na análise da variável de saída [27]. É importante ressaltar que quanto maior o número de variáveis de entrada maior o número de regras, o que torna o sistema mais dependente do conhecimento dos especialistas na integração entre as regras. Observa-se, então, que nesta simulação hipotética, o IET igual a 0,747 indica que o sistema pode ser enquadrado no termo linguístico hipereutrófico, conforme mostra a Figura 6.

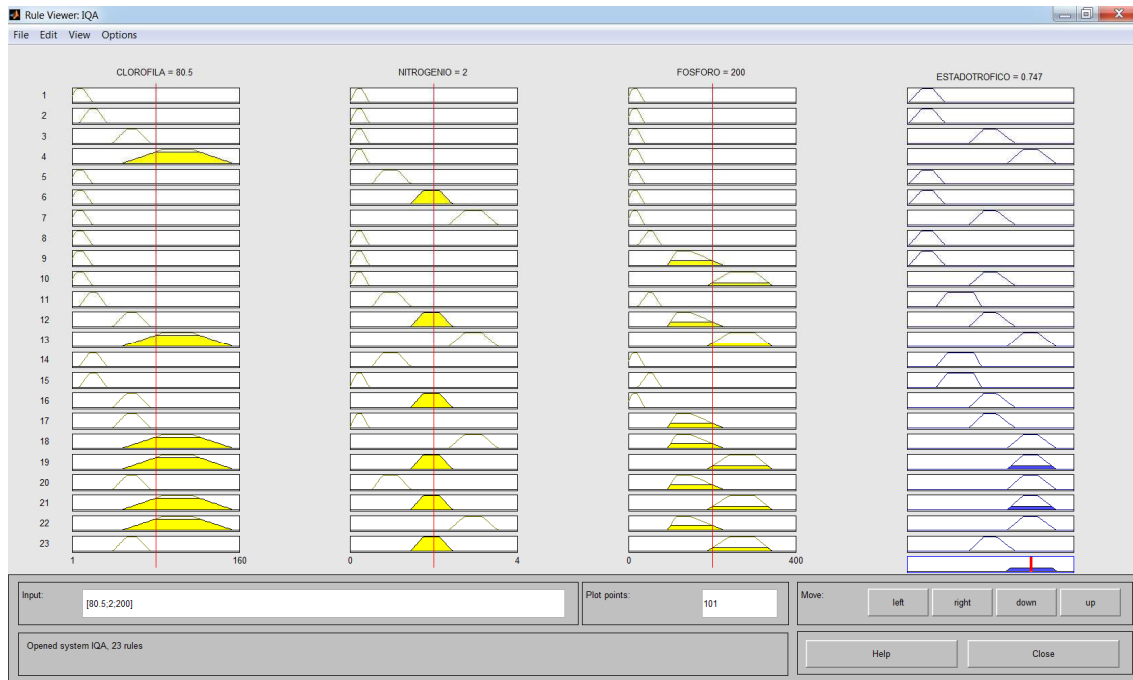


Figura 7: Regras fuzzy aplicadas

5. CONCLUSÃO

A aplicação de um modelo básico de análise *fuzzy* implica em escolher uma ferramenta amplamente flexível, que pode ser aplicada a um universo amostral reduzido e pode ser facilmente ajustável às condições experimentais. Neste trabalho, foi realizada a aplicação de um modelo fuzzy para classificar as condições ambientais de um corpo hídrico com base nas análises físico-químicas. Os resultados *fuzzy* mostraram uma combinação satisfatória entre os indicadores ambientais que classificam o reservatório entre níveis oligotrófico e hipereutrófico.

É importante ressaltar que vários os parâmetros físico-químicos normalmente podem ser utilizados para classificar o estado trófico de um corpo hídrico e isso, por vezes, pode confundir a interpretação dos resultados caso não exista a presença dos especialistas, neste caso, os especialistas em qualidade da água, na equipe de análise do fenômeno.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho são gratos ao CNPq pela bolsa de pesquisa concedida nos primeiros 18 meses do desenvolvimento do referido trabalho, bem como ao suporte técnico do pessoal do LQA-UFS.

1. BARBALHO, V. M. S.. Sistemas Baseados Em Conhecimento E Lógica Difusa Para Simulação Do Processo Chuva-Vazão. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, 2001
2. VIEIRA, V. P.; DINIZ, L.S.; LACERDA, E.G.M. ; CARVALHO, A.C.P.; LUDEMIR, T.B. Sistemas Inteligentes , aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais. Porto Alegre. Editora da Universidade / UFRGS, 1999
3. ALTUNKAYNAK, A.; OZGER, M.; ÇAKMAKCI, M.. Fuzzy logic modeling of the dissolved oxygen fluctuations in Golden Horn. Ecological Modelling, 189, 436-446, 2005
4. ICAGA, Y.. Fuzzy evaluation of water quality classification. Ecological Indicators. 7, 710-718, 2007
5. PEREIRA, G. C.; EVSULKOFF, A.. EBECKEN, N. F. F.. Fuzzy Modelling of Chlorophyll production in a Brazilian upwelling system. Ecological Modelling, 220, 1506-1512, 2009

6. LERMONTOV, A.; YOKOYAMA, L.; LERMONTOV, M.; MACHADO, M. A. S.. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. *Ecological Indicators*, 9, 1188-1197, 2009
7. PECHE, R.; RODRIGUEZ, E.. Development of environmental quality indexes based on fuzzy logic. A case study. *Ecological Indicators*, 23, 555-565
8. ANGULO, C.; CABESTANY, J.; RODRIGUEZ, P.; BATLLE, M.. Fuzzy expert system for the detection of episodes of poor water quality through continuous measurement. *Expert Systems with Applications*, 39, 1011-1020, 2012
9. FONSECA, O. L. H. Aplicação de métodos de análise espacial e da teoria dos conjuntos nebulosos em estudos sobre pobreza. 2003 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, 2003.
10. BITTENCOURT, Guilherme (2006) – Inteligência Artificial – Ferramentas e Teorias. Editora UFSC, Florianópolis, 3º ed., 371p.
11. OLIVEIRA JÚNIOR, Hime Aguiar e. Lógica Difusa: aspectos práticos e aplicações. Rio de Janeiro: Interciência, 1999.
12. NOVÁK, V.. Which logic is the real fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 157, 635-641, 2006
13. TSOUKALAS, L. H. e UHRIG, R. E.. *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*. New York: Wiley-Interscience Publication, 1997
14. CARLSON, R. E. e SIMPSON, J. A coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods. North American Lake Management Society, 1996, 96p.
15. ESTEVES, F. A.. Fundamentos de Limnologia. Rio de Janeiro: Interciência/FINEP, 1988, 575 p.
16. ZADEH, L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8, 338-353, *apud* BARBALHO, V. M. S.. *Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Difusa para Simulação do Processo Chuva-Vazão*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, 2001
17. OLIVEIRA JUNIOR, H. A., CALDEIRA, A. M., MACHADO, M. A., SOUZA, R. C. e TANSCHKEIT, R., *Inteligência Computacional aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab*. São Paulo: Thomson Learning, 2007
18. WESTPHAL, J. T. Modelagem Difusa de um Sistema Especialista Médico: Avaliação dos Fatores de Internação em Crianças Queimadas. 2003, 115f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Programa de pós-graduação em ciência da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
19. SIVANANDAM, S.N.; SUMATHI, S.; DEEPA, S.N. Introduction to fuzzy logic using MATLAB. Heidelberg: Springer, 2007, 430 p.
20. SAADE, J.J. A Defuzzification Based New Algorithm for the design of Mamdani-Type Fuzzy Controllers, *Mathware & Soft Computing*. Granada, vol 7, n.2-3, 2000.
21. SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica Nebulosa. *Anais da V Escola de Redes Neurais*. São José dos Campos, 1999, pp 73-90. Disponível em: <http://www.ele.ita.br/cnrm>
22. MALUTTA C. Método De Apoio à Tomada de Decisão Sobre a Adequação de Aterros Sanitários Utilizando a Lógica Fuzzy. 2004, 221f. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2004
23. American Public Health Association (APHA). Standard Methods for the examination of water and wastewater. 20 ed. Washington: APHA, 1998.
24. PIVELI, R.P.; KATO, M. T.. Qualidade das água e Poluição: Aspectos Físico-Químicos. São Paulo: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006
25. ALVES, J. P. H. ; GARCIA, C. A. B. . O rio Sergipe no entorno de Aracaju: qualidade da água e poluição orgânica. In: José do Patrocínio Hora Alves. (Org.). *Rio Sergipe: Importância, vulnerabilidade e preservação*. 1 ed. Aracaju: , 2006, v. 1, p. 87-109.
26. GARCIA, H. L., ALVES, J. P. H., CARVALHO, F. O., GARCIA, C. A. B.. Modelagem de processos de eutrofização em reservatórios usando a técnica de redes neurais In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química – XV COBEQ – Curitiba, 2004
27. MELO, M. N.. Mapeamento difuso no auxílio da redução dos impactos ambientais em uma usina hidrelétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Departamento de Engenharia de Energia. 2009.